基于InVEST模型的共和县生境质量时空变化及驱动因素

严　莉[1,2]，　曹广超[1,2,3]，　康利刚[1,2]，　刘梦琳[1,2]，　叶得力[4]

（1. 青海师范大学地理科学学院青海省自然地理与环境过程重点实验室，青海 西宁　810008；2. 青海师范大学青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室，青海 西宁　810008；3. 青海省人民政府-北京师范大学高原科学与可持续发展研究院，青海 西宁　810008；4. 青海黄河上游水电开发有限责任公司高原能源产业与生态研究中心，青海 西宁　810008）

摘　要：在新型城镇化背景下，青海省共和县作为兰西城市群建设的关键节点和典型的荒漠生态脆弱区，其经济和生态的协调发展对建设海南州可持续发展议程创新示范区具有重要意义。本研究基于2000年、2010年、2020年三期土地利用数据，利用InVEST模型，对2000—2020年共和县生境质量时空分布及效应变化特征进行探究，进而对生境质量的影响因子及其作用进行地理探测器和局部空间回归。结果表明：（1）2000—2020年共和县生境质量整体呈上升趋势，生境质量均值分别为0.612（2000年）、0.626（2010年）、0.627（2020年），生境质量空间分布存在明显的区域差异，空间格局上呈现北高南低的态势。（2）影响共和县生境质量的主驱动因子为年平均气温（TEM）和归一化植被指数（NDVI），因子间的交互作用对生境质量空间分异的影响大于单一因子，TEM与香农均匀度指数（SHEI）、香农多样性指数（SHDI）交互作用强烈。（3）TEM对生境质量呈负向效应，负向影响区域主要集中在共和北部与东部地区；NDVI呈正向效应，正向影响区域主要集中在共和中部与南部地区；国民生产总值（GDP）对生境质量的正向效应较2000年上升了30%，塔拉滩光伏促进了共和县生态产业协同发展。研究结果可为干旱区推动地方经济建设和生态环境保护提供科学的决策依据。

关键词：InVEST模型；生境质量；地理探测器；地理加权回归（GWR）；共和县；青海省

生境质量是指生态环境为个体和群体的持续发展提供适宜生存条件的能力，生境质量的变化是区域位置、地理特征、气候条件、人类活动的共同结果[1]。生境质量评估可以具体反映区域生物多样性水平[2-3]和生态环境优劣的程度，提高生境质量有助于保护和恢复生物多样性，保障区域生态安全[4]。因此，针对生境质量的动态监测、评估以及影响因子作用机制的分析显得尤为重要。这些研究有利于制定可持续发展的科学措施，对区域生态环境建设具有重要意义[5-6]。

目前，评价生境质量的方法主要分为两种。一种是在野外对特定物种或栖息地变化的调查基础上，明确其分布范围和特征，选取相应指标建立评价体系，对生境质量进行综合评估，由于该方法数据采集成本高，不适合大规模综合评价研究，一般用于小尺度的研究区。二是利用生态模型对生境质量进行评估，如GAM广义加性模型[7]、MIMES多尺度综合模型[8]和InVEST模型[9]，其中，InVEST模型是通过模拟不同土地覆被情景下生态系统服务的变化，实现生态系统服务功能价值定量与空间化，为决策者提供科学依据来权衡人类活动的效益和影响。因其数据集成便捷、操作简易以及结果可视化而被国内外广泛应用于多尺度、多层面的生态环境质量评估，如自然保护区[10]、海岸带地区[11]、流域单元[12]、快速城市化地区[13]、未来土地利用情景[14]。然而，较多研究在研究区域上偏重于对各类较发达地区城市扩张造成周围生境压迫和生物多样性破坏后生境质量分布格局的认知，研究

收稿日期：2023-08-10；　**修订日期：**2023-11-01
基金项目：青海省重大科技专项（2021-SF-A7-2）；青海省自然地理与环境过程重点实验室（2020-ZJ-Y06）
作者简介：严莉（1997-），女，硕士研究生，研究方向为自然地理与生态环境过程. E-mail: yll863890331@163.com
通讯作者：曹广超. E-mail: caoguangchao@126.com

方法上对其分布影响因素多利用简单的统计分析或空间分析工具,不能定量的揭示各影响因子的空间异质性和作用强度,以及因子间的协同能力,缺少针对我国生态本底脆弱的干旱荒漠区推进新型城镇化建设和现代高质量发展进程下,生境质量的变化评估及其影响因子作用的定量表达和空间分析。

共和县位于青藏高原东北部共和盆地中间地带,其气候干旱少雨、风沙活动强烈,是典型的荒漠生态脆弱区。作为国家可持续发展议程创新示范区和兰西城市群建设的战略要地,共和县是推进"一带一路"建设的重要节点,也是构筑国家生态环境保护壁垒的关键区域。随着共和县新型城镇化进程加快,频繁的人类活动造成部分地区自然生态系统功能的退化,进而威胁到多种动植物的生存环境。如何保障干旱区荒漠生态环境的安全与稳定,实现快速城镇化和区域经济发展过程中"经济-生态"的绿色协调,并有效提升生境质量,是干旱区亟待解决的重要问题。鉴于此,本文利用2000年、2010年、2020年三期土地利用数据和InVEST模型评估共和县不同时期生境质量的空间异质性,并综合运用地理探测器及地理加权回归模型(Geographically Weighted Regression,GWR)识别环境因素对生境质量的影响,以期为干旱区生物多样性保护、生态环境的治理修复和区域经济高质量发展提供科学依据与借鉴。

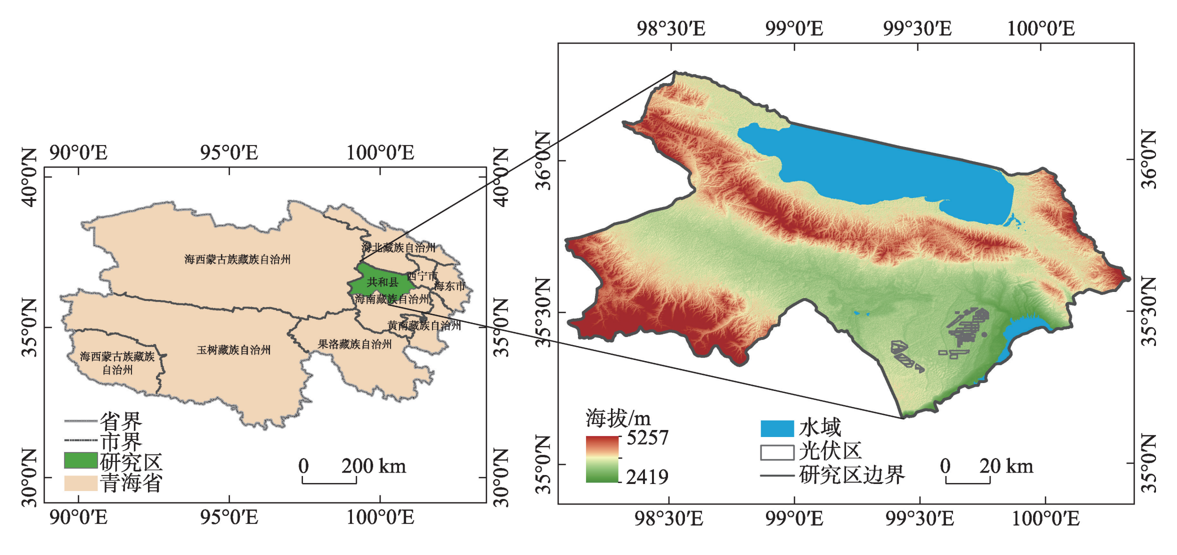
1　数据与方法

1.1　研究区概况

青海省共和县地处青藏高原东北部,地理坐标为98°54′~101°22′E、35°46′~37°10′N(图1),总面积约17252.28 km^2,北部是青海湖、日月山隆起带及青海南山,中部是山间盆地,南部为鄂拉山区,东侧为黄河谷地。地形以高原山地为主,平均海拔3200 m,属高原大陆性气候,干旱少雨,昼夜温差大,日照充足。年平均温度为0.7~6.3 °C,年均蒸发量1500~1900 mm,年均降雨量250~420 mm,年平均风速1.3 m·s^{-1},风沙活动强烈[15]。共和县地表植被类型主要包括草原、荒漠及草甸。

1.2　数据来源

土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)2000年、2010年和2020年三期土地利用现状数据集,空间分辨率为30 m,由人机交互解译方法生成;年均气温、年降水量和植被类型数据均来源于国家地球系统科学中心(http://www.geodata.cn/data/),空间分辨率为1 km;DEM数据来自地球科学数据云(https://www.gscloud.cn/)ASTER GDEM 30 m分辨率的数字高程数据,坡度由ArcGIS 10.2坡度工具提取;人口密度数据和GDP数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/),空间分辨率为



注:底图采用自然资源部标准地图制作,审图号为GS(2020)4619号,对底图边界无修改。下同。

图1　研究区地理位置

Fig. 1　Geographical location of the study area

1 km；归一化植被指数NDVI是基于谷歌地球引擎（Google Earth Engine，GEE）云平台，使用Landsat遥感影像提取，空间分辨率为30 m；景观格局指数利用Fragstats 4.2软件的移动窗口法计算，空间分辨率为1 km。本研究所有数据投影均统一为WGS_1984，重采样为1 km，并基于研究区面积，利用ArcGIS 10.2中渔网工具生成3 km×3 km网格用于测度自然环境和社会经济因素对生境质量影响程度的基本单元。

1.3 研究方法

1.3.1 InVEST模型计算生境质量 InVEST模型中，生境稀缺性和生境质量可以通过评价一个地区不同栖息地或植被类型的范围以及这些类型各自的退化程度来反映生物多样性的优劣程度。结合当地实情和文献资料[16-17]，本研究选择耕地、城镇用地、农村居民点、其他建设用地以及未利用地等受到人为干扰较强的区域，作为对生态环境的威胁因素，其计算公式如下[18]：

$$Q_{xj}=H_j\left[1-\left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z+k^2}\right)\right] \tag{1}$$

式中：Q_{xj}为j类生境类型中栅格x的生境质量，取值范围为[0，1]，值越接近1，表示该区域生境质量越高，生境越完整，对生物多样性的维持越有利；H_j为生境适宜性；z为归一化常量；k为半饱和参数；D_{xj}为生境退化度，表示生境的退化程度，其计算公式为：

$$D_{xj}=\sum_{r=1}^{R}\sum_{y=1}^{Y_r}\left(\frac{w_r}{\sum_{r=1}^{R}w_r}\right)r_y i_{rxy}\beta_x S_{jr} \tag{2}$$

式中：R为威胁因子个数；Y_r为威胁因子r对应的栅格数；w_r、r_y分别为受威胁源R所处地点对生境产生影响的权重和干扰大小；β_x、S_{jr}表示对生境的抗干扰性和敏感性；i_{rxy}为威胁因子Y_r与栅格x之间的距离函数，公式[19]如下：

$$i_{rxy}=1-\left(\frac{d_{xy}}{d_{r\max}}\right) \quad 线性衰减 \tag{3}$$

$$i_{rxy}=\exp\left(-\left(\frac{2.99}{d_{r\max}}\right)d_{xy}\right) \quad 指数衰减 \tag{4}$$

式中：d_{xy}为栅格x到栅格y的距离；$d_{r\max}$为威胁因子r的最大胁迫距离。

参照InVEST用户使用手册及相关研究[16-18,20]，结合研究区实际情况来确定该模块中需要的威胁因子及权重（表1），并结合植被类型和归一化植被指数NDVI来考量不同生境对威胁因子的敏感性和生境适宜度[21]（表2）。

表1 威胁因子及其权重

Tab. 1 Threat factors and weights

威胁因子	最大影响距离/m	权重	空间衰减方式
耕地	4	0.7	线性衰减
城镇用地	8	1	指数衰减
农村居民点	5	0.6	指数衰减
其他建设用地	8	0.4	指数衰减
未利用地	6	0.5	线性衰减

1.3.2 地理探测器及驱动因素选取 地理探测器是一种用于探测空间分异性、揭示因变量受驱动力影响的统计学方法[22]。借助地理探测器中的因子探测和交互作用探测，探究不同驱动因素对生境质量的解释程度以及它们之间的相互作用。其中，因子探测的计算公式为：

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2}{N\sigma^2} \tag{5}$$

式中：q为影响因子X对变量Y时空变化的解释能力，取值范围为[0，1]，随着值的增大，变量Y在的空间上的差异性更加显著；L为变量Y或因子X的分层；N_h和N分别为层h和全区的单元数；σ_h^2和σ^2分别为层h和全区Y值的方差。

交互作用探测是通过分析各因子间的交互作用来说明不同因子对变量Y的综合影响。交互作用类型分为非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强，独立和非线性增强。

生境质量的空间格局及其变化是由多种因素相互作用形成的结果[9,23-24]，本文通过对已有文献进行整理，并结合研究区实际情况，从自然地貌、植被生长、气候条件、社会经济及景观格局的角度，选取高程（DEM）、坡度（SLOP）、归一化植被指数（NDVI）、植被类型（VEG）、年平均气温（TEM）、年均降水（PRE）、国内生产总值（GDP）、人口密度（POP）、最大斑块指数（LPI）、香农均匀度指数（SHEI）、香农多样性指数（SHDI），散布与并列指数（IJI）共12个指标探测2000年和2020年共和县生境质量空间格局的影响机制。

1.3.3 地理加权回归模型（GWR） 生境质量受自然和人为因素的影响而存在变化，其作用方式和影响程度具有明显的空间异质性[25]。本文采用GWR

表2　各地类生境适宜度及对威胁因子的敏感性

Tab. 2　Habitat suitability and sensitivity to threat factors for each land class

二级地类	生境适宜度	耕地	城镇用地	农村居民点	其他建设用地	未利用地
旱地	0.5	0	0.6	0.5	0.5	0.4
灌木林	0.9	0.6	0.8	0.7	0.7	0.2
疏林地	0.85	0.7	0.9	0.8	0.8	0.2
其他林地	0.9	0.7	1	0.9	0.8	0.2
高覆盖草地	0.85	0.7	0.6	0.55	0.6	0.6
中覆盖草地	0.75	0.7	0.7	0.6	0.7	0.7
低覆盖草地	0.7	0.7	0.8	0.7	0.8	0.8
河渠	1	0.65	0.85	0.7	0.5	0.3
湖泊	1	0.7	0.85	0.7	0.5	0.3
水库坑塘	0.7	0.7	0.85	0.7	0.5	0.3
滩地	0.8	0.7	0.7	0.2	0.5	0.3
城镇用地	0	0.1	0	0	0.2	0.1
农村居民点	0.5	0.1	0	0	0.6	0.1
其他建设用地	0.2	0.1	0.1	0.1	0	0
沙地	0.3	0.2	0.1	0.1	0.5	0
戈壁	0.3	0.1	0.1	0.1	0.5	0
盐碱地	0.3	0.1	0.7	0.7	0.4	0
沼泽地	0.8	0.7	0.8	0.7	0.4	0
裸地	0.3	0.5	0.5	0.4	0.4	0
裸岩石质地	0.3	0.1	0.2	0.2	0.4	0
其他	0.3	0	0	0	0.2	0

模型测度2000年、2020年共和县3 km×3 km网格尺度下人为干扰和自然因素对生境质量的空间影响。地理加权回归允许被解释变量与解释变量之间的关系随位置发生变化,其结果具有空间尺度的可靠性,计算公式[26]为:

$$y_i = \beta_0(u_i,v_i) + \sum_{i=1}^{k}\beta_k(u_i,v_i)x_{ik} + \varepsilon_i \tag{6}$$

式中:y_i为采样点i的因变量值;(u_i,v_i)为采样点i在空间上的中心地理坐标;$\beta_0(u_i,v_i)$为位置i的截距;x_{ik}为采样点i的第k个自变量;$\beta_k(u_i,v_i)$为采样点i的第k个自变量的系数;ε_i为误差项。

2　结果与分析

2.1　生境质量的时空变化特征

从时间尺度上来看,2000—2020年共和县整体生境质量呈上升趋势,生境质量均值分别为0.612(2000年)、0.626(2010年)、0.627(2020年)。利用自然断点法将生境质量指数划分为高(Ⅴ)、较高(Ⅳ)、中等(Ⅲ)、较低(Ⅱ)和低(Ⅰ)5个等级。由表3可知,2000—2010年共和县Ⅰ级、Ⅱ级和Ⅲ级生境质量面积占比呈下降趋势,由45.96%下降至

表3　2000—2010年共和县生境质量面积转移矩阵及等级类型面积占比

Tab. 3　Habitat quality area transfer matrix and area proportion of grade type in Gonghe County from 2000 to 2010

	2010年							
	生境类型	Ⅰ级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅳ级	Ⅴ级	总计/km²	面积占比/%
2000年	Ⅰ级	365.38	59.26	15.89	11.09	1.86	453.49	2.63
	Ⅱ级	48.97	4230.38	281.82	185.98	22.21	4769.37	27.64
	Ⅲ级	2.79	61.37	2270.25	371.06	2.19	2707.67	15.69
	Ⅳ级	1.28	24.47	61.68	4706.20	474.66	5268.28	30.54
	Ⅴ级	0.00	4.78	10.18	87.24	3951.26	4053.46	23.50
	总计/km²	418.43	4380.27	2639.81	5361.57	4452.19	17252.28	
	面积占比/%	2.43	25.39	15.30	31.08	25.81		
	面积增减/km²	−35.06	−389.10	−67.86	93.29	398.72		

43.11%，Ⅳ级和Ⅴ级生境质量面积占比呈上升趋势，其中Ⅴ级增加最多，从23.50%上升至25.81%，主要原因是Ⅳ级生境质量的大幅提升，有474.66 km^{2}的Ⅳ级生境向Ⅴ级生境转移；但2000—2010年仍有302.77 km^{2}的Ⅱ级~Ⅴ级生境向Ⅰ级生境转移，说明这些地区具有潜在的生境退化风险。由表4可知，2010—2020年共和县各等级生境质量的面积转移较2000—2010年间的变化幅度减小，这是由于2010年和2020年共和县的土地利用方式和地被覆盖差异较小所导致；此外，2010—2020年Ⅰ级、Ⅱ级和Ⅲ级生境质量面积占比仍然呈下降趋势，Ⅳ级和Ⅴ级生境质量的面积占比持续上升，说明2000—2020年共和县生态环境持续向好发展；且较2000—2010年相比具有潜在退化风险的生境区域面积降低至181.25 km^2，说明部分区域生境退化的趋势得到扼制，生态环境得到一定改善。

从空间尺度上看，共和县的生境质量分布格局存在显著的空间差异，总体上表现为北高南低(图2a、图2b、图2c)，生境质量的空间分布特征与生境类型的分布实况基本符合。研究区生境质量的低

表4 2010—2020年共和县生境质量面积转移矩阵及等级类型面积占比

Tab. 4 Habitat quality area transfer matrix and area proportion of grade type in Gonghe County from 2010 to 2020

生境类型		2020年						
		Ⅰ级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅳ级	Ⅴ级	总计/km^2	面积占比/%
2010年	Ⅰ级	363.96	51.02	2.33	1.12	0.00	418.43	2.43
	Ⅱ级	20.46	4248.27	69.83	31.63	10.08	4380.27	25.39
	Ⅲ级	7.45	42.00	2525.07	63.45	1.85	2639.81	15.30
	Ⅳ级	16.40	18.67	25.91	5235.35	65.23	5361.57	31.08
	Ⅴ级	1.87	2.78	1.26	44.45	4401.83	4452.19	25.81
	总计/km^2	410.14	4362.74	2624.40	5376.00	4479.00	17252.28	
	面积占比/%	2.38	25.29	15.21	31.16	25.96		
	面积增减/km^2	-8.29	-17.53	-15.42	14.43	26.81		

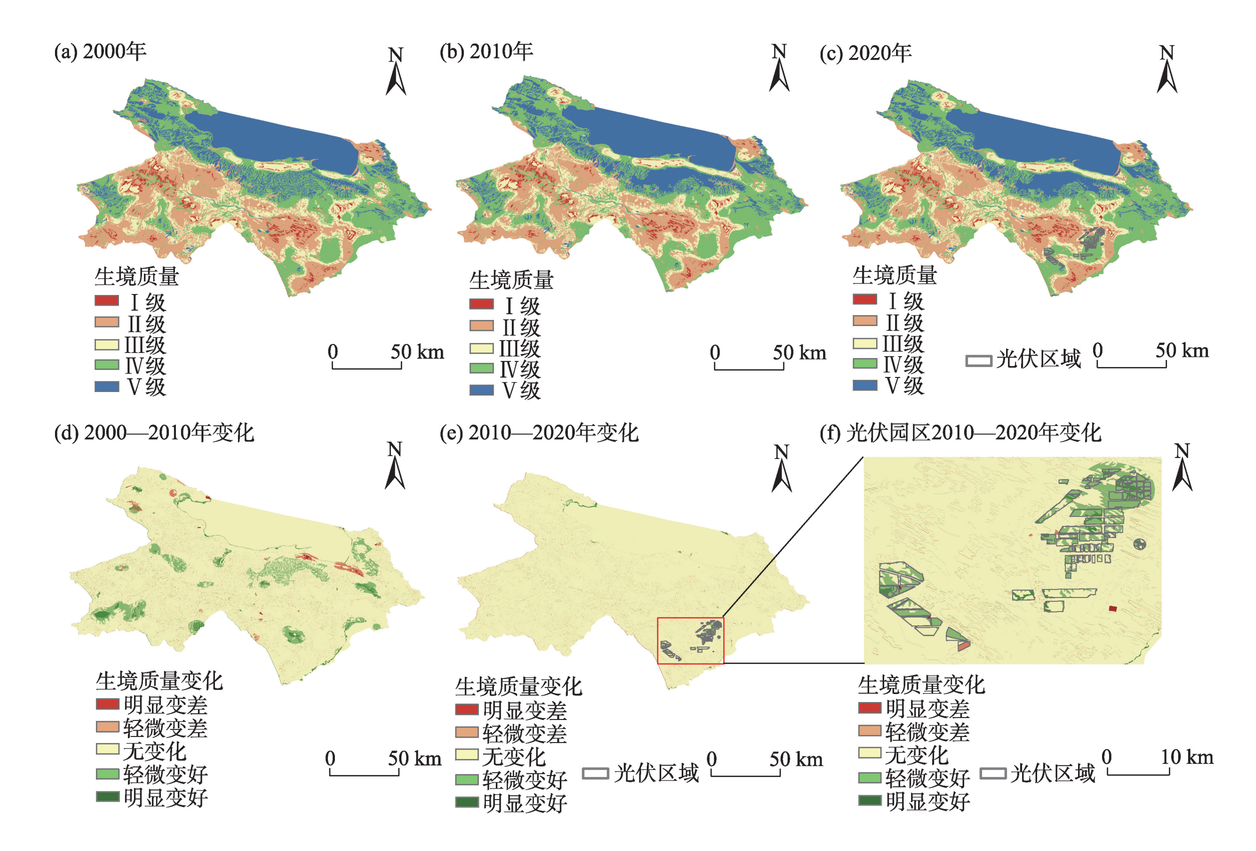


图2 2000—2020年研究区生境质量空间分布和变化

Fig. 2 Spatial distribution and changes in habitat quality in the study area from 2000 to 2020

值区(Ⅰ级和Ⅱ级)主要分布在切吉乡、沙朱玉乡、铁盖乡所处的中部共和盆地,这些区域由于冰雹、干旱、风沙等灾害性天气较多,水源缺乏,其间分布着大片沙漠或沙化地带,是共和县的主要沙漠区;生境质量相对高值区(Ⅴ级和Ⅳ级)主要聚集在北部青海湖盆地的受保护区域,该区域主要以大型湖泊、湿地、林地、草地为主,受人为活动干扰较小,植被覆盖度高。此外,部分低山丘陵与河流的生境质量也处于较高水平。利用自然断点法将2000—2010年、2010—2020年生境质量指数的变化划分为:明显变差、轻微变差、无变化、轻微变好、明显变好5个等级。从生境质量的空间变化图可知(图2d),2000—2010年共和县生境质量改善较为明显,生境质量上升的区域分布在青海湖水域、青海南山、部分低山丘陵、切吉乡的南部高山、塔拉滩及黄河龙羊峡库区;生境质量下降的区域主要集中在青海湖南部沿岸。由图2e、图2f可知,2010—2020年共和县生境质量上升的区域主要集中于青海湖西岸水域和塔拉滩光伏区,下降的区域主要为塔拉滩变电站的建设用地,其余区域由于地类覆被变化不显著从而导致共和县2010年、2020年的生境质量无明显差别,因此,后文仅讨论共和县2000年和2020年生境质量分布的变化及其影响因素。

2.2 地理探测器结果

运用地理探测器对2000年、2020年共和县生境质量的影响因子进行单因子探测和交互探测分析。受空间尺度的影响,各因子对生境质量的解释程度具有差异。2000年共和县生境质量影响因子单因子探测结果(图3a)q值前5由大到小排序为:TEM(0.34)>VEG(0.28)>SHEI(0.25)>SHDI(0.24)>NDVI(0.21)。2020年单因子探测结果(图3b)q值前5由大到小排序为:NDVI(0.35)>VEG(0.27)>TEM(0.33)>SHEI(0.24)>LPI(0.22)。综合来看,2000年生境质量解释力最大的影响因子是TEM,2020年生境质量解释力最大的是NDVI,NDVI的q值由0.21增长到0.35,增长率66.7%,影响程度明显增强。

通过交互作用分析可知,研究区两因子交互作用下的q值均大于单因子的q值,且交互作用均表现为双因子增强或非线性增强。2000年交互作用影响q值均大于0.45的有TEM∩SHEI(0.49)、TEM∩SHDI(0.48)、NDVI∩VEG(0.47)、VEG∩TEM(0.47)、VEG∩NDVI(0.47)。2020年交互探测q值略有变化,交互作用影响q值均大于0.45的有NDVI∩VEG(0.49)、NDVI∩SHEI(0.48)、TEM∩SHEI(0.47)、NDVI∩TEM(0.46)、NDVI∩LPI(0.46)、NDVI∩SHDI(0.46)、NDVI∩LPI(0.46)、NDVI∩TEM(0.46)。综合来看,交互作用解释力最大的均为NDVI和TEM主导的单因子与其他因子的组合,说明NDVI和TEM共同决定了不同生境类型的空间分布。

2.3 影响因子作用的空间差异

为进一步探究环境因素对生境质量影响的作用方向及强度的空间差异,采用GWR模型对影响因子进行局部空间回归分析。考虑到各变量之间冗余会造成结果误差,因此,本研究采用普通最小二乘法(OLS)对各变量进行共线性检验。根据VIF

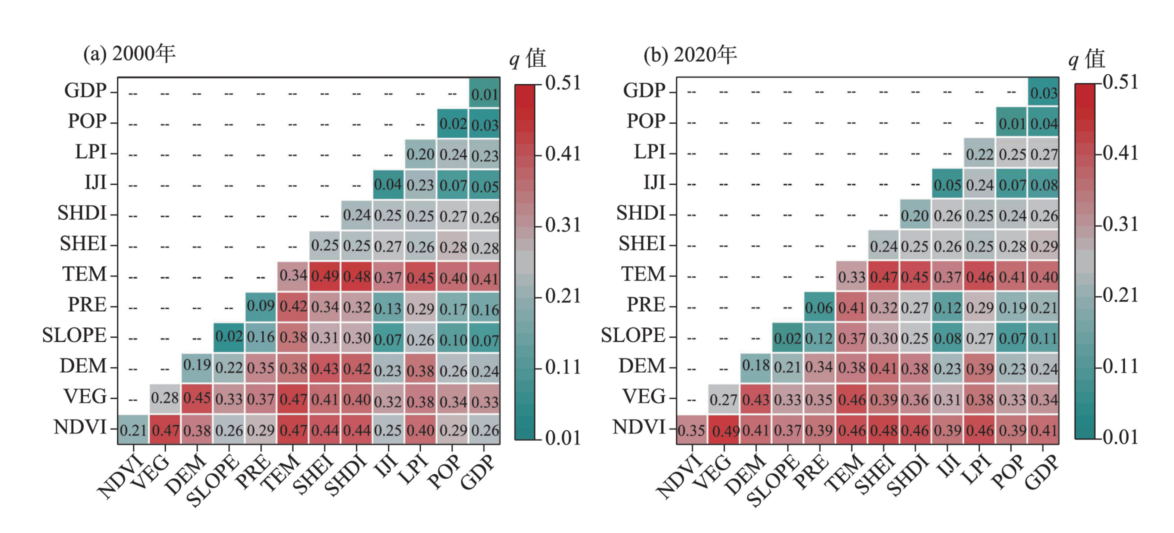


图3　2000年、2020年生境质量影响因子交互探测结果

Fig. 3　Interaction detection results of habitat quality impact factors in 2000 and 2020

的结果，DEM、SHDI、IJI、POP的方差膨胀因子大于7.5，具有高度共线性，故剔除并分析其余因子对生境质量的空间作用机制。基于筛选后的影响因子，利用MGWR 2.2软件构建地理加权回归模型，结果显示整体模型表现较好，2000年和2020年模型拟合优度(R^2)平均值分别达0.87和0.84，均高于OLS模型。

由图4可知，2000年GDP对生境质量有显著的负向影响效应，负值比例达65.1%，最大负向影响区域集中于青海湖范围，回归系数介于－0.62~－0.32之间；LPI具有正负双向效应，回归系数正值比例达48.4%，主要集中在青海湖东岸，负值比例达51.6%，最大影响区域集中于青海湖南岸；SHEI对生境质量呈现显著的负向影响效应，负值比例达78.4%，且影响区域较为分散；SLOPE回归系数介于－1.09~0.50之间，正向影响区域主要集中在共和县的山间盆地及部分低山丘陵；PRE对生境质量有较强的正向影响效应，回归系数正值比例达62.1%，最大正向影响区域集中于龙羊峡库区，回归系数介于－2.71~5.63之间；TEM对生境质量有较强的负向影响效应，回归系数负值比例达62.4%，主要集中于北部青海湖区域；NDVI对生境质量有显著的正向影响效应，正值比例达66.4%，最大正值影响区域位于共和县南部的塔拉滩荒漠带；VEG回归系数介于－3.14~1.13之间，最大正值影响区域主要集中于共和盆地中部的沙珠玉地区。

由图5可知，GDP的正向影响效应进一步加大，从34.9%(2000年)上升至45.3%(2020年)。从影响强度空间分布上看，除共和县边缘少数区域以外，GDP以青海湖为核心，由内向外对共和县生境质量

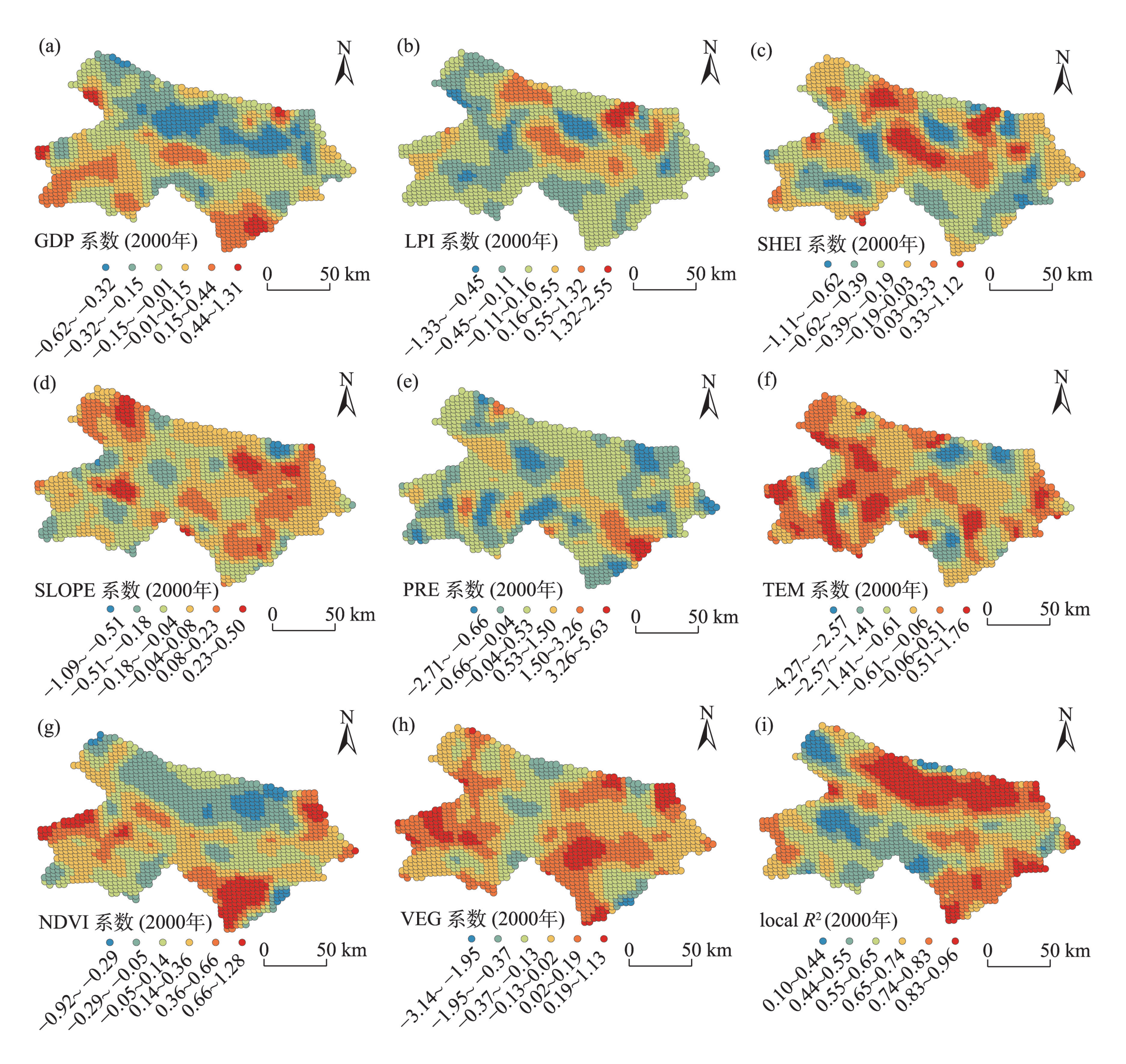


图4 2000年GWR模型影响因素回归系数空间特征

Fig. 4 Spatial characteristics of regression coefficients of influencing factors of GWR model in 2000

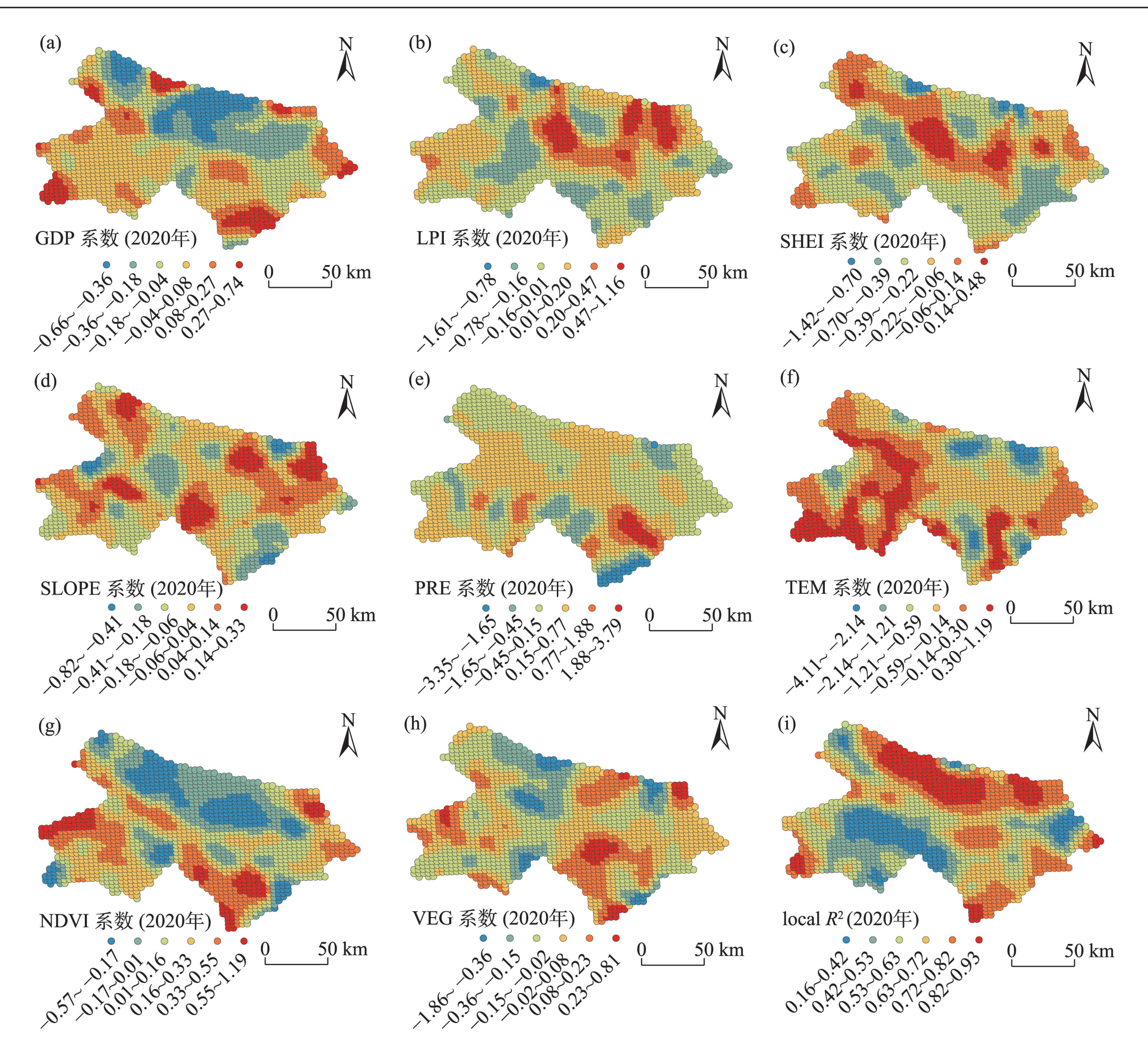


图5　2020年GWR模型影响因素回归系数空间特征

Fig. 5　Spatial characteristics of regression coefficients of influencing factors of GWR model in 2020

的正向影响力逐渐升高,在空间分布上呈现环带式分布特征;2020年LPI较2000年正向影响区域近一步扩大并集中于青海湖东岸与南岸,负向影响区域空间分布较为分散;2020年SHEI的负向影响进一步加强,负值比例上升至80.8%;影响区域除青海湖南岸少数地区外,广泛分布于全县范围;2020年SLOP的负向影响减弱,正向影响得到了加强,回归系数正值比例上升了9%;PRE对生境质量影响的作用空间较2000年发生明显变化,正负影响最大区域都集中于龙羊峡及塔拉滩地区;2020年部分地区TEM的正向影响减弱,负向影响加强,其中,最大正向影响区域集中于共和县西部;NDVI对生境质量基本以正向效应为主,较2000年相比整体区块化特征显著,除少数地区外,作用空间以青海湖为界,呈现南正北负的空间分布特征;VEG对生境质量的负向影响进一步得到加强,最大负向影响区域较2000年更为集中于青海湖区域及共和县部分南部边缘。

3　讨论

城镇化建设与地方产业发展引起的景观格局和生产能力的改变对生态环境的影响不容忽视。本研究以共和县为例,探讨了干旱区生境质量水平并评价其时空特征,从多个层面揭示了环境因素与经济发展变化对生境质量的影响。2000—2020年,共和县生境质量总体呈上升趋势,高等级生境面积不断增加,这与我国针对生态本底脆弱和产业基础薄弱的地区,实施生态保护和治理提升、生态农牧、新经济培育等政策密切相关,且共和县作为典型的农牧经济发展体系,以推动现代生态农牧业高质量发展为核心,生态保护为前提,着力提升农牧结构

调整,实现农畜产品输出,在社会经济上促进增产增效,同时保障生态安全促进生境质量的提升;另外,区域经济的不平衡发展也是造成生境质量空间异质性的原因,青海湖南部沿岸的江西沟镇是2000—2010年间生境退化较为明显的区域,其位于青海湖南岸的环湖地区,分布着大面积的倾斜平原和湖滨平原,拥有辽阔的天然牧场,且该地水源充足,雨水充沛,适合农业发展;西部大开发战略的实施也使得青海湖成为青海省旅游形象代表,环湖地区成为重要的旅游经济区[27]。江西沟镇的经济体系形成以畜牧业为主,兼营种植业、旅游业的格局,从而导致区域人口稠密,同时,耕地、建设用地等资源的大量消耗与干扰,使得周围的生境退化更加严重。2000—2010年生境质量明显提升区域主要分布在青海湖、共和盆地两侧的高山和部分荒漠区,其原因一方面由于青藏高原气候暖湿化,区域夏季降水强度和降雨量同时增加,青海湖多年水位持续回升[28-30];另一方面,受生态保护政策的影响,共和县政府积极推进生态治理建设,在黄河龙羊峡库区、遗留矿地等进行生态修复,生态环境较2000年有明显改善。2010—2020年生境质量提升的区域主要集中在共和县塔拉滩,该地区由于地势平坦、日照充足,自2013年起大力发展新能源产业,打造光伏生态示范区,已有研究表明,光伏阵列的规则排布可以降低周围空气湍流强度,从而降低阵列间的风速[31],这也极大程度上阻碍了风沙运动,且光伏面板的遮荫及降水再分配作用直接影响土壤温湿度,改变区域土壤水分动态,促进植被生长,对局地生态环境的影响更为显著[32],本文光伏园区生境质量变化的结果(图2f)与此结论相符。此外,2020年较2010年相比共和县生境质量变化的幅度略小,生态环境的变化不显著,其原因主要是2010—2020年间共和县的植树造林、封山育林、防沙治沙等项目工程是在2000—2010年的基础上对原有保护区或治理区进行重点维护,如青海湖、青海南山、沙珠玉、三江源等治理工程,从而出现2010—2020年的地被覆盖变化小,土地利用转移不显著的情况。

地理探测器和GWR的结果均表明,气候和植被是影响群落种群分布、维持生物多样性的重要因素。共和县地处青藏高原,气候变化是高原生态系统变化的主控因子,植被生长易受水热因子驱动[33]。TEM与PRE对生境质量的空间作用表明:回归系数的正向影响区域基本分布在中部的盆地及南部的高山,该区域的植被类型主要为高山草甸和高寒草原,研究表明气温升高和降水量的增加可在很大程度上刺激该类植被的生长发育[34-35]。谢宝妮[36]研究得出,在NDVI的增长中,气候变化影响的贡献占比高达70%。这表明,尽管PRE对生境质量空间异质性解释力不高,但降雨增多可以缓解干旱区植被受水分胁迫的问题,且自2000—2020年,NDVI对生境质量的解释力变大,说明高原气候暖湿化促进植被生长从而增强对生境质量的影响。景观格局是生态过程的载体,格局变化会引起相关生态过程的变化,从而导致生境质量的优劣[37]。本研究中景观格局因子与自然环境因子的交互作用强烈,说明区域景观格局的变化与异质性和自然环境因素的共同作用会显著影响生境质量的变化,未来加大对自然环境的保护,避免景观格局的破碎化,在一定程度上可以保护该区域生物多样性。此外,景观格局指标可以揭示城镇化进程对生态资源的影响程度。SHEI、LPI的回归系数对生境质量共同的正向影响区域均集中在青海南山,该区域的林地、草地受政策保护,开发程度低、各类景观类型均匀分布稳定性较高。生态保护与新型城镇化建设的高质量发展之间具有系统性和整体性,良好的耦合协调状态会形成良性循环[38],从而实现以绿色发展为导向的可持续发展道路。本研究发现,2000—2020年随着共和县经济发展和人口增长,GDP对生境质量的正向影响效应上升了30%,其正向影响区域主要分布在切吉乡、铁盖乡和沙珠玉乡,该区域建立农牧循环、草原畜牧业转型升级的绿色发展体系,实现了"双促进、双发展"现代生态农牧业经济;此外,GDP对塔拉滩光伏基地的正向效应显著,这表明绿色光伏可以实现生态产业协同发展。因此,在发展社会经济的同时,应注重保护自然环境,优化生活、生产空间,权衡好城市发展与生态保护之间的关系,严守生态红线,实现可持续、高质量的发展。

本文基于InVEST模型评估了2000—2020年青海省共和县生境质量的时空变化,并综合利用地理探测器和GWR模型,全面探讨了自然环境和人为干扰下生境质量变化影响的空间异质性及空间作用方式,并对于研究区2000—2020年土地覆被变化较小的情况,利用植被类型和植被生长状况的表征因子对各生境适宜度进行修正[39],一定程度上提高了研究的科学性。此外,由于GWR模型对于空间关联度较小的分析单元可能产生结果波动,后续的研究需要继续提高数据精度、优化模型参数并细化分析单元,从而更加精准的解析各因素的影响机

制,使评估的结果更具实际意义。

4 结 论

(1) 2000—2020年青海省共和县的生境质量整体呈上升趋势,生境质量均值分别为0.612(2000年)、0.626(2010年)、0.627(2020年)。从空间分布上看,共和县生境质量分布格局存在显著的空间差异,总体上表现为"北高南低"的分布特征,与区域土地利用分布实情基本符合。

(2) TEM和NDVI是影响共和县生境质量空间分布差异的主要驱动因子,任意两种影响因素的交互作用q值都大于单因子作用的q值,交互作用均表现为双因子增强或非线性增强。2000年、2020年起最大主导作用的交互因子分别为TEM∩SHEI(0.49)、NDVI∩VEG(0.49),气温、植被及景观格局等自然环境因素共同影响共和县生境质量的变化。

(3) GWR模型较好的揭示了多种影响因素对生境质量不同的作用关系。受青藏高原气候暖湿化影响,TEM和PRE对共和县中部和南部地区生境质量的正向影响效应显著,NDVI对生境质量呈显著的正向影响,并以青海湖为界呈现"南负北正"的空间分布特征,GDP对塔拉滩光伏区呈现明显的正向效应,LPI、SHEI的共同正向影响区域均集中于青海南山,SLOPE和VEG对不同地区的生境质量有正向或负向的影响。

参考文献(References):

[1] Mohan M, Kandya A. Impact of urbanization and land-use/land-cover change on diurnal temperature range: A case study of tropical urban airshed of India using remote sensing data[J]. Science of the Total Environment, 2015, 506: 453-465.

[2] Fellman J B, Hood E, Dryer W, et al. Stream physical characteristics impact habitat quality for Pacific salmon in two temperate coastal watersheds[J]. PloS one, 2015, 10(7): e0132652.

[3] Hillard E M, Nielsen C K, Groninger J W. Swamp rabbits as indicators of wildlife habitat quality in bottomland hardwood forest ecosystems[J]. Ecological Indicators, 2017, 79: 47-53.

[4] 彭建, 徐飞雄, 吴见, 等. 典型旅游城市生境质量空间分异及其影响机理研究——以黄山市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(10): 2397-2409. [Peng Jian, Xu Feixiong, Wu Jian, et al. Spatial differentiation of habitat quality in typical tourist city and their Influencing factors mechanisms: A case study of Huang shan City[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(10): 2397-2409.]

[5] Dominique W, Gabriela S, Klaus E. Predicting habitat quality of protected dry grasslands using landsat NDVI phenology[J]. Ecological Indicators, 2018, 91: 447-460.

[6] Barbara R, Stefan L. A spatially explicit patch model of habitat quality, integrating spatio-structural indicators[J]. Ecological Indicators, 2018, 94: 128-141.

[7] 粟一帆, 李卫明, 李金京, 等. 桥边河大型底栖动物生境适宜性[J]. 生态学报, 2020, 40(16): 5844-5854. [Su Yifan, Li Weiming, Li Jinjing, et al. Habitat suitability of macroinvertebrates: A case study in Qiaobian River, atributary of Yangtze River, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(16): 5844-5854.]

[8] Boumans R, Roman J, Altman I, et al. The Multiscale Integrated Model of Ecosystem Services (MIMES): Simulating the interactions of coupled human and natural systems[J]. Ecosystem Services, 2015, 12: 30-41.

[9] 刘永婷, 杨钊, 徐光来, 等. 基于MGWR模型的皖江城市带生境质量对城镇化的响应研究[J]. 地理科学, 2023, 43(2): 280-290. [Liu Yongting, Yang Zhao, Xu Guanglai, et al. Impacts of urbanization on habitat quality using MGWR models in Wanjiang City Belt [J]. Scientia Geographica Sinica, 2023, 43(2): 280-290.]

[10] 提杨, 庄鸿飞, 陈敏豪, 等. 天津市自然保护地与区域生境质量的时空演变格局[J]. 生态学报, 2023, 43(7): 2770-2780. [Ti Yang, Zhuang Hongfei, Chen Minhao, et al. Spatio-temporal evolution pattern of protected areas and regional habitat quality in Tianjin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(7): 2770-2780.]

[11] 张海涛, 李加林, 田鹏, 等. 基于土地利用变化的东海区大陆海岸带生境质量时空演变研究[J]. 生态学报, 2023, 43(3): 937-947. [Zhang Haitao, Li Jialin, Tian Peng, et al. Spatio temporal evolution of habitat quality in the East China Sea continental coastal zone based on land use changes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(3): 937-947.]

[12] 程静, 王鹏, 陈红翔, 等. 渭河流域生境质量时空演变及其地形梯度效应与影响因素[J]. 干旱区地理, 2023, 46(3): 481-491. [Cheng Jing, Wang Peng, Chen Hongxiang, et al. Spatiotemporal evolution of habitat quality in the Weihe River Basin and its topographic gradient effects and influencing factors[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(3): 481-491.]

[13] 陈实, 金云翔, 黄银兰. 长三角中心区生境质量时空变化及其影响机制[J]. 生态学杂志, 2023, 42(5): 1175-1185. [Chen Shi, Jin Yunxiang, Huang Yinlan. Spatio-temporal variations of habitat quality and its underlying mechanism in the central region of Yangtze River Delta[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(5): 1175-1185.]

[14] 任胤铭, 刘小平, 许晓聪, 等. 基于FLUS-InVEST模型的京津冀多情景土地利用变化模拟及其对生态系统服务功能的影响[J]. 生态学报, 2023, 43(11): 4473-4487. [Ren Yinming, Liu Xiaopin, Xu Xiaocong, et al. Multi scenario simulation of land use change and its impact on ecosystem services in Beijing Tianjin Hebei region based on the FLUS-InVEST model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(11): 4473-4487.]

[15] 赵恒伦. 青海省社会经济统计年鉴[M]. 青海: 中国统计出版社, 1986: 251-258. [Zhao Henglun. Social and Economic Statistics Yearbook of Qinghai Province[M]. Qinghai: China Statistics Press, 1986: 251-258.]

[16] 胡丰, 张艳, 郭宇, 等. 基于PLUS和InVEST模型的渭河流域土

地利用与生境质量时空变化及预测[J]. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1125-1136. [Hu Feng, Zhang Yan, Guo Yu, et al. Spatial and temporal changes in land use and habitat quality in the Weihe River Basin based on the PLUS and InVEST models and predictions[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(4): 1125-1136.]

[17] 许宝荣, 刘一川, 董莹, 等. 基于InVEST模型的兰州地区生境质量评价[J]. 中国沙漠, 2021, 41(5): 120-129. [Xu Baorong, Liu Yichuan, Dong Ying, et al. Evaluation of habitat quality in Lanzhou region based on InVEST model[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(5): 120-129.]

[18] 包玉斌, 刘康, 李婷, 等. 基于InVEST模型的土地利用变化对生境的影响——以陕西省黄河湿地自然保护区为例[J]. 干旱区研究, 2015, 32(3): 622-629. [Bao Yubin, Liu Kang, Li Ting, et al. Effects of land use change on habitat based on InVEST model: Taking Yellow River wetland nature reserve in Shaanxi Province as an example[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(3): 622-629.]

[19] 赵庆建, 吴晓珍. 基于InVEST模型的岷江流域土地利用变化对生境质量的影响研究[J]. 生态科学, 2022, 41(6): 1-10. [Zhao Qingjian, WU Xiaozhen. Research on the impact of land use change on habitat quality in Minjiang River Basin based on InVEST Model[J]. Ecological Science, 2022, 41(6): 1-10.]

[20] 韩艳莉, 陈克龙, 于德永. 土地利用变化对青海湖流域生境质量的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28(10): 2035-2044. [Han Yanli, Chen Kelong, Yu Deyong. Evaluation on the impact of land use change on habitat quality in Qinghai Lake Basin[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(10): 2035-2044.]

[21] 潘耀, 尹云鹤, 侯文娟, 等. 基于土地利用及植被覆盖变化的黄河源区生境质量时空变化特征[J]. 生态学报, 2022, 42(19): 7978-7988. [Pan Yao, Yin Yunhe, Hou Wenjuan, et al. Spatiotemporal variation of habitat quality in the Source Region of the Yellow River based on land use and vegetation cover changes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(19): 7978-7988.]

[22] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134. [Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.]

[23] 吴艳霞, 刘方南, 陈宝童. 黄河流域下游城市群生境质量时空演变及驱动因素分析[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 396-404. [Wu Yanxia, Liu Fangnan, Chen Baotong. Spatial and temporal evolution and drivers of habitat quality in lower Yellow River Basin urban agglomeration[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 396-404.]

[24] 王琦琨, 武玮, 杨雪琪, 等. 陕西省生境质量时空演变及驱动机制分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39(5): 1684-1694. [Wang Qikun, Wu Wei, Yang Xueqi, et al. Spatial-temporal changes and driving factors of habitat quality in Shaanxi Province during the past 20 years[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(5): 1684-1694.]

[25] 刘春芳, 王川. 基于土地利用变化的黄土丘陵区生境质量时空演变特征——以榆中县为例[J]. 生态学报, 2018, 38(20): 7300-7311. [Liu Chunfang, Wang Chuan. Patio-temporal evolution characteristics of habitat quality in the Loess Hilly Region based on land use change: A case study in Yuzhong County[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(20): 7300-7311.]

[26] Brunsdon C, Fotheringham A S, Charlton M E. Geographically weighted regression: A method for exploring spatial nonstationarity [J]. Geographical Analysis, 1996, 28(4): 281-298.

[27] 陈慧慧. 青海湖景区开发与环湖社区参与旅游现状研究——基于江西沟乡元者村为个案的人类学调查[J]. 青藏高原论坛, 2015, 3(1): 66-71. [Chen Huihui. Research on the development of Qinghai Lake scenic area and the current situation of community participation in tourism around the lake: An anthropological investigation based on Yuanzhi Village in Jiangxi Gou Township as a case study[J]. Qinghai-Tibetan Plateau Forum, 2015, 3(1): 66-71.]

[28] 杜嘉妮, 李其江, 刘希胜, 等. 青海湖1956—2017年水文变化特征分析[J]. 水生态学杂志, 2020, 41(4): 27-33. [Du Jiani, Li Qijiang, Liu Xisheng, et al. Characterisation of hydrological changes in Qinghai Lake from 1956 to 2017[J]. Journal of Water Ecology, 2020, 41(4): 27-33.]

[29] 金章东, 张飞, 王红丽, 等. 2005年以来青海湖水位持续回升的原因分析[J]. 地球环境学报, 2013, 4(3): 1355-1362. [Jing Zhangdong, Zhang Fei, Wang Hongli, et al. The reasons of rising water level in Lake Qinghai since 2005 [J]. Journal of Earth Environment, 2013, 4(3): 1355-1362.]

[30] 张洪源, 吴艳红, 刘衍君, 等. 近20年青海湖水量变化遥感分析[J]. 地理科学进展, 2018, 37(6): 823-832. [Zhang Hongyuan, Wu Yanhong, Liu Yanjun, et al. Water storage variation of the Qinghai Lake in recent decades based on satellite observation[J]. Progress in Geography, 2018, 37(6): 823-832.]

[31] Pratt R N, Kopp G A. Velocity measurements around low-profile, tilted, solar arrays mounted on large flat-roofs, for wall normal wind directions[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013, 123: 226-238.

[32] Thorne J H, Boynton R M, Flint L E, et al. The magnitude and spatial patterns of historical and future hydrologic change in California's watersheds[J]. Ecosphere, 2015, 6(2): 1-30.

[33] 杨达, 易桂花, 张廷斌, 等. 青藏高原植被生长季NDVI时空变化与影响因素[J]. 应用生态学报, 2021, 32(4): 1361-1372. [Yang Da, Yi Guihua, Zhang Tingbin, et al. Spatiotemporal variation and driving factors of growing season NDVI in the Tibetan Plateau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(4): 1361-1372.]

[34] 马扶林, 刘小伟, 朵莹, 等. 日尺度下水热因子变化对青藏高原高寒草原生产力的影响特征[J]. 生态学报, 2023, 43(9): 3719-3728. [Ma Fulin, Liu Xiaowei, Duo Ying, et al. Effects of daily variation of hydro-thermal factors on alpine grassland productivity on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(9): 3719-3728.]

[35] 鲍艳, 王玉琦, 南素兰, 等. 青藏高原植被对未来气候变暖的反馈[J]. 高原气象, 2023, 42(3): 553-563. [Bao Yan, Wang Yuqi, Nan Sulan, et al. Response of vegetation over the Qinghai-Xizang plateau to projected warming climate[J]. Plateau Meteorology, 2023, 42(3): 553-563.]

[36] 谢宝妮. 黄土高原近30年植被覆盖变化及其对气候变化的响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016. [Xie Baoni. Vegetation

Dynamics and Climate Change on the Loess Plateau, China: 1982- 2014[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2016.]

[37] 樊应凭, 金晓斌, 陈传钊, 等. 沿海都市区景观格局与生态环境质量的时空演变及关联性分析——以海口市秀英区为例[J]. 现代城市研究, 2023(3): 116-124, 132. [Fan Yingping, Jin Xiaobin, Chen Chuanzhao, et al. Spatial-temporal evolution and correlation analysis of landscape pattern and ecological environment quality in coastal metropolitan area: A case study of Xiuying District, Haikou [J]. Modern Urban Research, 2023(3): 116-124, 132.]

[38] 张杰, 张剑勇, 马蓝. 黄河流域生态保护与高质量发展耦合协调关系实证分析[J]. 人民黄河, 2024, 46(1): 19-24. [Zhang Jie, Zhang Jianyong, Ma Lan. An empirical analysis of the coupled and coordinated relationship between ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin[J]. People's Yellow River, 2024, 46(1): 19-24.]

[39] Zhu C, Zhang X, Zhou M, et al. Impacts of urbanization and landscape pattern on habitat quality using OLS and GWR models in Hangzhou, China[J]. Ecological Indicators, 2020, 117: 106654.

Analysis of spatial and temporal changes in habitat quality and driving factors in Gonghe County using the InVEST model

YAN Li[1,2], CAO Guangchao[1,2,3], KANG Ligang[1,2], LIU Menglin[1,2], YE Deli[4]

(1. Qinghai Provincial Key Laboratory of Physical Geography and Environmental Processes, College of Geographical Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810008, Qinghai, China; 2. Key Laboratory of Tibetan Plateau Land Surface Processes and Ecological Conservation, Ministry of Education, Qinghai Normal University, Xining 810008, Qinghai, China; 3. Academy of Plateau Science and Sustainability, People's Government of Qinghai Province & Beijing Normal University, Xining 810008, Qinghai, China; 4. Qinghai Upper Yellow River Hydropower Development Limited Liability Company, Plateau Energy Industry and Ecology Research Centre, Xining 810008, Qinghai, China)

Abstract: In the context of Gonghe County's role as a pivotal node in Lanxi urban agglomeration and its position as a representative desert area within the new urbanized framework, maintaining a delicate balance between economic and ecologic development is crucial. This balance holds great significance for China in advancing the new development paradigm and implementing the Sustainable Development Agenda's Innovation Demonstration Zone in Hainan Prefecture. Based on the land use data of 2000, 2010, and 2020, this study utilizes the InVEST model to explore spatial and temporal distribution and habitat quality dynamics in Republican County from 2000 to 2020. Additionally, it investigates influencing factors and their effects on habitat quality using geographic probes and GWR methods. Key results are as follows: (1) Overall habitat quality in Republican County showed an upward trend from 2000 to 2020, with mean values of 0.612, 0.626, and 0.627, respectively. Regional disparities in the spatial distribution of habitat quality were evident, portraying a high-to-low spatial pattern from north to south. (2) Mean annual temperature (TEM) and normalized vegetation index (NDVI) were the main driving factors impacting habitat quality in Gonghe County. The interaction between these factors had a greater influence on spatial differentiation than a single factor, with TEM interacting strongly with Shannon's evenness index (SHEI) and Shannon's diversity index (SHDI). (3) The GWR model quantified different driving characteristics and strengths of each driver on habitat quality at the spatial level. TEM exhibited a negative impact on habitat quality, primarily concentrated in the republic's northern and eastern areas. Gross domestic product (GDP) positively influenced habitat quality, showing a 30% increase compared to 2000, while the photovoltaic system at Tala Shoal promoted synergistic eco-industry development in Gonghe County. This study's findings offer a scientific basis for decision-making processes aimed at promoting local economic construction and ecological protection in arid areas.

Keywords: InVEST model; habitat quality; geographic probe; geographically weighted regression (GWR); Gonghe County; Qinghai Province